レーザーオリジナル

2.1 μm Hoレーザーを用いたアイセー
フライダーシステムの開発

斉藤保典*・キンパイ チャン**・デニスキリンジャー***

(1993年11月10日 受理)

Development of an Eye-Safe Lidar
System Using a 2.1 μm Ho Laser

Yasunori SAITO*, Kin-Pui CHAN** and Dennis K. KILLINGER***

(Received November 10, 1993)

A 2.1 μm "eye-safe wavelength", 25mJ/pulse (A/O Q-switching), 90ns/pulse Ho lidar system has been developed to measure atmospheric extinction coefficients, α , and backscatter coefficients, β . Range resolved values of α and β were obtained at ranges covering up to 1.5km for several 24 hour periods. The average values of α were on the order of 10^{-3} to 10^{-4}m^{-1} and β values were estimated on the order of 10^{-5} to $10^{-6} \text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$. The variation of α as a function of range was small during the period from night to early morning, but increased significantly during the later daytime hours. The values of β were somewhat higher from midnight to early morning than just after sunrise and then gradually decreased. β values exhibited good correlation with the atmospheric humidity. From these observations it was confirmed that the lidar system developed is a powerful apparatus for remote sensing of the atmosphere.

Key Words: Eye-safe Ho Laser, Lidar, Atmospheric extinction coefficient, Backscatter coefficient.

1. はじめに

大気中に存在するエアロゾル(浮遊粉塵)の総量は、人間の生産活動(例えば、自動車からの排気ガス、工場排煙など)と深い関わりを持つ。高濃度エアロゾルは、単独でも呼吸器管などに害を与える他、いわゆる大気汚染物質同士の反

応において触媒的な働きをし、光化学スモッグ発生などにおいて重要な役割を担っている。大気汚染に関与するエアロゾルの調査においては、エアロゾルの発生から移流拡散、そして漂着に至る一連の動的挙動をリアルタイムで追跡調査することが重要である。このような目的の為に、広領域に渡る大気環境変化を高距離分

* 信州大学工学部情報工学科(〒380長野市若里500)

** アメリカ海洋大気局電波伝播研究所(米国コロラド州ボルダー)

*** 南フロリダ大学タンパ校物理学科(米国フロリダ州タンパ)

* Shinshu University, Faculty of Engineering, 500 Wakasato, Nagano 380, JAPAN

** NOAA Wave Propagation Laboratory, Boulder, Colorado 80303, U.S.A.

*** University of South Florida, Department of Physics, Tampa, Florida 33620, U.S.A.

解能・高時間分解能で、しかもなるべく一台のシステムで遠隔的に観測が可能なライダーシステムの利用が極めて有効である。

エアロゾル観測用ミー散乱ライダーでは、大気中に照射したパルスレーザーの散乱光の時空間変化を検出し、エアロゾルに関する情報を得るものであるが、大気汚染に係わる高濃度エアロゾルは都市域に発生することが多く、そのような人工密集地帯におけるレーザー光伝播においては、特に人間の目に対する安全性に注意を払わなければならない。従来より、ミー散乱ライダーの光源には、YAGレーザーの第2高調波(532nm)が多用されてきた。これに対して最近開発が盛んな近赤外～中赤外固体レーザーは、目に対する安全度を表す最大許容露光量が、他の波長領域と比較して桁違いの高い値を有することから、比較的高出力のパルスレーザーを大気中に伝播させて使用するライダー計測には適したレーザーと言える¹⁾。

このような観点から、2.1 μm の発振波長を有するHoレーザーを光源としたアイセーフライダーシステムを構築して、都市大気中エアロゾルの24時間連続観測を行い、その有用性についての検討を行った。

2. 2.1 μm アイセーフライダーシステムの構築

2.1 システム構築の基本方針

前章でも述べたように、人間の目に対する安全性(アイセーフ)を第一条件としてシステムの構築を行った。パルスレーザーのビーム内観察最大許容露光量(MPE)をIECの基準案²⁾に従って各波長領域毎に計算したものがFig. 1である。この結果より、最大許容露光量の値が1.4 μm 以上の波長領域で特に大きくなることを考慮し、発振波長が2.1 μm にあり高出力パルス発振が可能なHo固体レーザーを使用することにした。Hoレーザーを使用したアイセーフの条件はNASA, ESA, NASDAなどで計画中のスペースライダー等への応用という観点からの潜在的な要求をも満たすものである。またHoレーザー

Fig. 1 Maximum Permissible Exposure (MPE) of pulse lasers depending on wavelength under 50ns laser pulse.

は、いわゆるアイセーフレーザーであることに加え、レーザーダイオード励起が可能のため小型軽量化が達成できること、2.1 μm 帯で波長可変特性を示す³⁾ことなどの特徴を有するため、ミー散乱以外の方式(例えばDIAL⁴⁾)などへの応用も可能である。

これまでライダー観測に使用されてきた種々のレーザー光源と比較して、2.1 μm 波長を大気中エアロゾル観測に用いた場合には次のような利点が得られる。同じアイセーフ条件に優れたCO₂レーザー(10 μm)と比較して体積後方散乱係数の値が大きいため、良好な信号対雑音比が得られる。その結果観測可能距離範囲が拡大する。また散乱係数の波長依存性を考慮すると、2.1 μm においては大気分子による(レーリー)散乱よりもエアロゾルによる(ミー)散乱が卓越するため、観測結果より直接的にエアロゾル量を評価することができる。YAG(532 nm)ライダー観測結果のように、散乱パラメータを仮定した2成分方程式を解析的に解いてエアロゾル量を推定する必要がない。

2.2 Ho固体レーザーの動作実験³⁾

Ho固体レーザー用のレーザー媒質はHo:

Fig.2 Photograph of the pulse shape of the A/O Q-switched Ho laser.

YSGG(Yttrium Scandium Gallium Garnets)を用いた。ロッド形状は直径5mm×長さ75mmで、Ho (濃度 $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$) の他に Cr (濃度 $2 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$) と Tm (濃度 $8 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$) が含まれている。共振器長は67 cmでフラッシュランプを用いて励起した。Qスイッチ用素子としては LiNbO_3 等が使用されることが多いが、 $2.1 \mu\text{m}$ 帯で僅かであるが吸収を示すことがあり、高出

力動作時における素子の損傷や破壊の危険性を考慮し、本研究では石英製A/O素子を用いた。A/O素子はHoロッドと全反射ミラー間に挿入され、27.1 MHzのRF周波数で駆動された。

フラッシュランプ波形、ノーマル発振波形、RFドライバーのON・OFFタイミング等とQスイッチレーザー光波形や出力との関係を実験的に調べた結果、フラッシュランプトリガからの遅延時間が約630 μs の時に、 TEM_{00} モードでパルスエネルギー25 mJ、パルス幅88 nsの特性を得た。Qスイッチパルス波形の一例をFig. 2に示す³⁾。このときのフラッシュランプへの入力エネルギーは156 J、繰り返しは3 pps、冷却水温度は16 $^{\circ}\text{C}$ であった。ノーマル発振の出力はフラッシュランプへの入力を増大させるとほぼ線形に増大したが、Qスイッチ出力は飽和の傾向を示した。エタロン板(0.2 mm厚と1.0 mm厚)を用いて波長可変特性を調べた結果、 $2.083 \mu\text{m}$ をピーク波長とする $2.081 \sim 2.087 \mu\text{m}$ の間で波長同調が可能であった。スペクトル幅は約0.1 nmで、これは使用した分光器により制限された。

Fig.3 Schematic of the eye-safe Ho lidar system.

2.3 ライダーシステム

2.1 μm Hoレーザーを用いたアイセーフライダーシステムを構築した。システムの構成図をFig. 3に示す。発振器からのレーザー光はコリメータで5倍(ビーム径1 cm, ビーム広がり約0.4 mrad.)に広げられ, 5枚の全反射ミラーにより実験室の窓より大気中に導かれた。最終的に大気中へ出射されたレーザーエネルギーは約6mJで, 伝送ミラー間での損失が大きい。エネルギー密度は 76 J/m^2 と計算され, アイセーフの条件を満たしている。大気からの後方散乱光は, $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ のミラーにより直径30 cm, 焦点距離175 cmのニュートン型望遠鏡へと導かれた。受信望遠鏡の視野角は検出器の前に配置された絞りにより1 mrad. 程度に調節された。受信された後方散乱光は, スペクトル幅 $0.35 \mu\text{m}$ のコールドフィルター付きの液体窒素冷却(77 K)InSb検出器上に集光され検出された。検出器の比検出能力(D^*)は $3.8 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}$ (帯域0.3 MHz, 負荷インピーダンス $385 \text{ k}\Omega$)であった。検出器からの電気信号は100倍の増幅後100 MHzのデジタルオシロスコープでデジタル化と積算平均化がとられた後, パーソナルコンピュータに転送され解析のために保存された。またエネルギーメータを用いて出力をモニターし, 解析の際のエネルギー補正に用いた。送信系と受信系のアライメントを容易にするため2台のテレビカメラとモニターを用意した。

3. 24時間連続大気観測結果例

システムは南フロリダ大学タンパ校物理学科の3階実験室(地上高約7 m)に配置され, レーザー光はほぼ水平方向に出射された。受信信号はデジタルオシロスコープで1000パルス(約5分30秒)の単純加算平均がとられた後, マイクロコンピュータにより距離分解能100.5 mで移動加算解析処理された。受信信号波形の一例をFig. 4に示す。

Fig. 5に, 解析の結果得られた大気消散係数と体積後方散乱係数(それぞれ平均値)の時間変

Fig.4 Lidar return signal $P(R)$, range corrected data $P(R)R^2$, and logarithmic range corrected data $\text{Ln}P(R)R^2$.

化の一例を示す⁵⁾。システムより約200 m離れた地上約10 mの高さで, 毛髪湿度計と温度計を用いて得られた相対湿度と気温を一緒に示した。エアロゾル体積後方散乱係数の絶対値は, 建物の壁からの散乱信号と比較する⁶⁾ことにより推定された。消散係数と体積後方散乱係数にみられる“エラーバー”は各時間毎に得られた距離方向での最大値と最小値であり, 空間的な変動の大きさを表わしている。図から明らかなよ

Fig.5 Lidar measurements of the atmospheric extinction coefficient (α) and backscatter coefficient (β) obtained as a function of time on May 13-14, 1991. Temperature and humidity data is also shown.

うに、消散係数は $5 \times 10^{-2} \sim 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ および体積後方散乱係数は $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 程度の値に分布した。消散係数および体積後方散乱係数は、夜間から早朝には変化が小さく日中においては大きな変化を示した。これは、前者の時間帯では大気状態が比較的安定で均一で、また後者においては大気対流活動が活発になるためと思われる。特に体積後方散乱係数は相対湿度が高い夜間に増加し、低湿度の日中では低い値を示した。実験当日の目視による日の出の時刻は午前7:00時前後であり、日の出より約1時間遅れて体積後方散乱係数が急激に(約1桁/時)減少した。また同様に相対湿度も減少していることが

ら、夜間における高い体積後方散乱係数の値は水溶性のエアロゾルによるものである可能性が強い。日中に時折みられるスパイク状の高い値は、ライダーシステムのすぐ近くで行われていた建築工事に由来する高濃度ダストの影響と考えられる。また1 km離れた道路付近において、自動車によるものと思われる体積後方散乱係数の増加がみられたことを付記しておく。

4. まとめ

発振波長を $2.1 \mu\text{m}$ に有するHoレーザーを送信光源としたアイセーフライダーシステムを構築して、24時間連続大気環境観測を実施した。

システムは24時間以上に渡って安定に動作することが実験的に確かめられた。

観測結果より、消散係数は $5 \times 10^{-2} - 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ 、また体積後方散乱係数は $10^{-4} - 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ のオーダーの値を持つことが示された。相対湿度の観測結果と比較することにより、夜間には水溶性のエアロゾルが卓越し、日中には多種多様なエアロゾルが存在していることが示唆された。

筆者らの調査によれば、2.1 μm アイセーフ波長においての時空間分解を有した消散係数や体積後方散乱係数と大気状態(相対湿度や気温)の関係についてのライダー連続観測結果の報告は、本研究が最初のものと思われる。Hoライダーに限らず、これまで近赤外-中赤外波長を用いたライダーシステムは、他の波長領域と比較してその開発が遅れていた波長領域である。このような観点からも本研究の結果は重要な意義を有するものと考えている。またそのアイセーフという優れた特徴から、大気環境研究やリモートセンシングの分野において、今後益々興味のもたれる波長領域と思われる。

謝 辞

本研究はNASA/Langley Research Center 及

びFlorida High Technology and Industry Council からの援助の基に行われた。また米国での研究の機会を与えて頂いた、信州大学工学部、鹿野哲生教授及び野村彰夫教授に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 斉藤保典：“アイセーフレーザー”，O plus E No.157 (1992) 73.
- 2) レーザー学会編：“レーザーハンドブック”，オーム社 (1979) 829.
- 3) Y. Saito, K. P. Chan and D. K. Killinger: “Performance characteristics of acousto-optic Q-switched tunable 2.1 μm Ho: YSGG Laser”: 光学 20 (1991) 612.
- 4) S. Cha, K. P. Chan and D. K. Killinger: “Eye-Safe 2.1 μm Ho lidar for simultaneous range-resolved measurements of atmospheric water vapor and aerosol backscatter profiles”: Appl. Opt. 30 (1991) 3938.
- 5) Y. Saito, K. P. Chan and D. K. Killinger: “2.1 μm Ho lidar measurement of the temporal and spatial variability in the range-resolved extinction and backscatter coefficient of the atmosphere”: in Technical Digest on Optical Remote Sensing of the Atmosphere (OSA, Washington D. C.,) 18 (1991) 297.
- 6) N. Sugimoto, N. Sims, K. P. Chan, and D. K. Killinger: “Eye-safe 2.1 μm Ho lidar for measuring atmospheric density profiles”: Opt. Lett. 15 (1990) 302.